

II CONGRESO NACIONAL DE LA INGENIERIA AERONAUTICA

Comunicación n.º 111

PROGRAMAS DE INVESTIGACION SOBRE PROPAGACION DE LLAMAS EN CONDICIONES DE GRAVEDAD REDUCIDA. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Carlos Sánchez Tarifa

Dr. Ingeniero Aeronáutico
Profesor Emérito ETSIA, UPM
Ingeniero Consultor SENER

Amable Liñán Martínez

Dr. Ingeniero Aeronáutico
Académico, Catedrático ETSIA, UPM

José Salva Monfort

Dr. Ingeniero Aeronáutico
Catedrático ETSIA, UPM

G. López Juste

Dr. Ingeniero Aeronáutico
Prof. Titular ETSIA, UPM

Gregorio Corchero Díaz

Dr. Ingeniero Aeronáutico
Prof. Titular ETSIA, UPM
Ingeniero Consultor, SENER

COMUNICACION 111

PROGRAMAS DE INVESTIGACION SOBRE PROPAGACION DE LLAMAS EN CONDICIONES DE GRAVEDAD REDUCIDA.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

C. Sánchez Tarifa
Dr. Ingeniero Aeronáutico
Profesor Emérito ETSIA, UPM
Ingeniero Consultor, SENER

A. Liñán
Dr. Ingeniero Aeronáutico
Académico, Catedrático ETSIA, UPM

J. Salvá
Dr. Ingeniero Aeronáutico
Catedrático ETSIA, UPM

G. López Juste
Dr. Ingeniero Aeronáutico
Prof. Titular ETSIA, UPM

G. Corchero
Dr. Ingeniero Aeronáutico
Prof. Titular ETSIA, UPM
Ingeniero Consultor, SENER

1. INTRODUCCION

Se presenta en este trabajo un resumen del programa experimental sobre propagación de llamas a gravedad reducida que se está llevando a cabo por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos; programa en el que últimamente colabora la empresa SENER.

La propagación de llamas sobre la superficie de un sólido en atmósfera reactante es un tipo de proceso fuertemente afectado por la convección libre, y por tanto, especialmente sensible al valor de la gravedad.

Además de su interés científico, el estudio de este proceso en condiciones

de microgravedad o de gravedad reducida, presenta un considerable interés bajo el punto de vista de seguridad en cuanto a incendios en laboratorios o vehículos espaciales. Este problema no tiene simplemente un interés académico sino que responde a un peligro real. En el Space Shuttle han acontecido ya dos indicios de fuego, que se extinguieron aislando los circuitos eléctricos afectados, y en uno de los laboratorios soviéticos Salyut se inició un incendio que requirió la utilización de los equipos de extinción. Estos equipos se consideran imprescindibles y representan una importante masa a transportar (40 Kg, solamente de CO₂, estaban previstos para la estación Freedom).

Las tres fases a considerar de un fuego son: su iniciación (ignición), propagación y extinción. Los tres procesos son fuertemente afectados por la gravedad, especialmente los dos primeros. El tercer proceso es de tipo mixto con participación de la combustión.

La ignición espontánea o por fuente térmica externa (chispa eléctrica, por ejemplo), es difícil de experimentar en condiciones de microgravedad, por el factor de riesgo de explosión que lleva consigo; y por no ser posible llevarlo a cabo en torres de caída libre, por requerir tiempos considerablemente mayores que los 2-4 segundos de experimentación con gravedad reducida que permiten dichas torres. Está previsto que el equipo que investiga la propagación de llamas, estudie el problema de la ignición, utilizando para esto cohetes de sondeo.

En este trabajo se exponen los resultados de un programa ya concluido de experimentación sobre propagación de llamas en condiciones de gravedad reducida, que se ha llevado a cabo sobre vuelos parabólicos. La continuación de este programa, en el que se estudiarán los efectos de la convección forzada, en avión de sondeo, está ya siendo desarrollado. Todos estos programas se están llevando a cabo mediante contratos con la Agencia Europea del Espacio.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL EN AVIONES LABORATORIO.

Programas experimentales sobre propagación de llamas a gravedad reducida no existían mas que los realizados con materiales celulósicos muy finos (papel), que por su rápida combustión permiten su realización en torres de caída libre; disponiéndose solamente de algunos resultados. Por tanto, el programa de investigación, cuyos resultados se presentan, es de naturaleza pionera.

La realización del programa se llevó a cabo en las primeras tres campañas en los aviones laboratorio KC-135 de la NASA (Boeing 707), con quién ESA mantenía un acuerdo de colaboración. La última campaña se llevó a cabo en el nuevo avión laboratorio Caravelle de la ESA.

Como es sabido, la reducción de gravedad se consigue mediante vuelos parabólicos en los que se mantienen aceleraciones medias de unos 10^{-2} g, durante unos 20 segundos (Fig. 1, Ref. 1). Durante cada campaña se llevaron a cabo unos 25 vuelos, y en cada vuelo 24 parábolas.

La realización de la experimentación tuvo que enfrentarse a especificaciones en extremo restrictivas en cuanto a seguridad. Por primera vez se llevaba a cabo un programa de investigaciones sobre combustión en cámara cerrada en un avión tripulado; y además, ocurrió la catástrofe del Challenger coincidiendo con el programa.

Ello obligó, entre otras muchas cosas, a diseñar cámaras de combustión extraordinariamente resistentes (se ensayaron a una presión seis veces superior a la presión máxima prevista), por lo que resultaron muy pesadas. El combustible sólido seleccionado fue el polimetil-metacrilato (PMMA), extraordinariamente seguro; pero no fue permitido utilizar un sistema de ignición basado en una pastilla de propulsante de doble base, que estaba inicialmente previsto a causa de problemas de seguridad. Se utilizó un encendido por resistencia eléctrica, que originaba largos tiempos de ignición, por lo que había que iniciar el encendido antes de comenzar cada vuelo parabólico, lo que alteró algunos resultados.

Las cámaras de combustión fueron diseñadas robustas y sencillas. El volumen de las mismas se fijó con la condición de que la composición de los gases en su interior variase en pequeña proporción (menos de un 5%), durante el tiempo de combustión a gravedad reducida, con objeto de poder tomar un valor medio y considerarlo constante. Ello requirió un cálculo previo y su posterior comprobación experimental. (Ref. 2).

Con objeto de evitar el problema de la evacuación de gases al exterior del avión y el reacondicionamiento de la cámara en vuelo¹, se utilizaron simultáneamente varias cámaras: tres en la primera campaña (Fig. 2) y seis en las siguientes (Fig. 3). Las cámaras se llenaban previamente en tierra con la mezcla $N_2 - O_2$ a la composición y presión prefijadas.

La velocidad de propagación de la llama se determinó mediante cámara fotográfica, con medición de tiempos y con una longitud de referencia.

Las variables del proceso fueron las siguientes:

- Composición de la mezcla ($O_2 - N_2$).
- Presión.
- Espesor del combustible sólido.

Los experimentos se llevaron a cabo con cilindros y placas rectangulares de PMMA.

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De los muy numerosos resultados obtenidos, se han seleccionado como ejemplos ilustrativos los mostrados en las Figs. 4, 5, 6 y 7. En estas figuras se muestra la influencia de la concentración de oxígeno y los efectos de la presión. En todos los casos los resultados se comparan con

¹ Sólomente se disponía de 2 minutos entre parábola y parábola.

los obtenidos a 1 g.

También se muestran ejemplos demostrativos de secuencias fotográficas de la combustión en placas rectangulares y varillas cilíndricas (Figs. 8 y 9).

Se señala, de nuevo, que estos han sido los primeros resultados obtenidos en condiciones de gravedad reducida con combustibles sólidos gruesos (térmicamente gruesos).

Los resultados obtenidos tuvieron una cierta falta de precisión. Ello fue debido principalmente al corto tiempo disponible (a veces solamente unos 15 segundos), oscilaciones en el nivel gravitatorio (Fig. 1) y perturbaciones introducidas por la ignición. No obstante, los resultados experimentales fueron suficientes para conseguir una importante información sobre las velocidades de propagación y de cómo influyen en ellas los principales parámetros del proceso.

Se obtuvo que la velocidad de propagación tiene una ley de variación aproximadamente lineal con la concentración de oxígeno y es proporcional a la presión elevada a $2/3$ (Fig. 10). Ambas conclusiones se predijeron teóricamente como se expone en otra Comunicación presentada a este Congreso².

La influencia del espesor del combustible, de difícil verificación, pudo también obtenerse aproximadamente como se muestra en la Fig. 11.

La variación de la velocidad de propagación en función de la gravedad como es natural no pudo verificarse por no disponer mas que de dos niveles gravitatorios (1 g y 10^{-2} g). Posiblemente podrá determinarse mediante la experimentación con cohetes de sondeo, programa que ya está en desarrollo y que se expone en el Apartado siguiente.

² A. Liñán y colaboradores.

4.- PROGRAMA EXPERIMENTAL EN COHETES DE SONDEO

4.1 FASE PRELIMINAR EN LABORATORIO

La utilización de cohetes sondeo para llevar a cabo programas de experimentación en condiciones de gravedad reducida viene llevándose a cabo con regularidad desde hace ya varios años; pero todavía no se ha llevado a cabo experimentación alguna sobre combustión.

Esta experimentación sobre combustión presenta problemas de espacio y reuso de la cámara, pero en cambio ofrece considerables ventajas en cuanto a economía y ausencia de riesgo personal en comparación con la experimentación que pueda llevarse a cabo en satélites, además, el nivel gravitatorio durante la fase de experimentación es bajo (10^{-4} g) y muy constante (Fig. 12, Ref. 3). El estudio general de los problemas de la utilización de motores cohete para la realización de programas de combustión se presentan en la Comunicación n° 20 de este Congreso.

La decisión de continuar el programa de experimentación sobre propagación de llamas en cohetes de sondeo se debió fundamentalmente al interés de estudiar la influencia de la convección forzada en la velocidad de propagación a bajos números de Reynolds³. Este problema tiene un doble interés: científico y práctico.

En primer lugar, el interés científico resulta de no ser posible analizar el proceso a 1 g, ya que la convección libre enmascara por completo la convección forzada si las velocidades de soplado son pequeñas. En segundo lugar, en el caso de un incendio en una nave o laboratorio espacial, debe contarse con la existencia de pequeñas corrientes de aire producidas por los equipos de aire acondicionado e incluso por las personas moviéndose en el laboratorio. Estas corrientes de aire a velocidad reducida pueden alterar considerablemente el proceso cuando la propagación de llamas se produce en condiciones de microgravedad.

³ El número de Reynolds no es el parámetro adimensional característico de este proceso.

Para la definición de los experimentos a realizar en cohete de sondeo, hubo previamente que estudiar e investigar diversos problemas específicos que lleva consigo la realización de experimentos sobre combustión en cohetes. Estos problemas son el reuso y relleno de la cámara durante la realización del experimento y las fluctuaciones fluidodinámicas residuales en la cámara a continuación del "spin-off" o frenado de la velocidad de rotación del cohete al entrar en la fase de microgravedad.

Otros problemas, como la posible perturbación del nivel gravitatorio en la carga útil del cohete al expulsar gases de la cámara, lo que genera empuje, y los problemas de volumen del módulo fueron tratados con el prediseño del módulo y se exponen en la Comunicación nº 20 de este Congreso.

4.2 REUSO Y RELLENO DE LA CAMARA

Inicialmente estaba previsto que el programa se llevase a cabo en el cohete de sondeo Texus, con el que se disponen de unos seis minutos en condiciones de microgravedad. Este tiempo es muy superior al necesario para realizar experimentos de propagación con una sola varilla o placa de combustible. Por ello, se estudió la posibilidad del vaciado y relleno de la cámara, como mecanismo de extinción de la combustión y de utilización de una nueva mezcla.

Este relleno constituye el origen del problema, ya que forzosamente ha de efectuarse en un tiempo corto, originándose fluctuaciones en el interior de la misma, que tardan un tiempo considerable en amortiguarse.

El cálculo del tiempo de amortiguación, que es un problema de tipo asintótico, es en extremo difícil y se resolvió experimentalmente. Se empleó para ello, una cámara de volumen y forma semejantes a la que se utilizaría en vuelo, midiéndose las fluctuaciones del fluido mediante la iluminación por láser de partículas de óxido de aluminio (Fig. 13). Los resultados se muestran en la Fig. 14.

El programa propuesto está previsto actualmente que se lleve a cabo en el

Minitexus, con un período en microgravedad de solamente tres minutos, por lo que el reuso de la cámara no es necesario.

En caso de vuelos de mayor duración (6-12 minutos), el citado problema de las fluctuaciones requiere una cuidadosa programación de los experimentos (velocidades altas de convección después de los rellenos) para una utilización óptima del tiempo.

Los cohetes de sondeo llevan a cabo un frenado de su velocidad de rotación axial antes de iniciarse el período de microgravedad. Se consideró la posibilidad de que este proceso pudiera originar fluctuaciones semejantes a las del caso del relleno de la cámara. A este respecto, se montó un dispositivo de ensayo reproduciéndose las velocidades de giro y tiempos de frenado del Texus y Minitexus (4Hz/40s Y 5Hz/30s) utilizándose un sistema de iluminación de partículas análogo al anteriormente descrito.

Las fluctuaciones residuales fueron despreciables, a lo que probablemente contribuyó la posición excéntrica (no axial) del módulo y su pequeño tamaño. No obstante, este problema queda pendiente de investigación en módulos axiales de gran tamaño.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL PROPUESTO

Las variables mas importantes en un proceso de propagación de llamas son la velocidad del flujo convectivo y el ángulo que forma esta velocidad con la velocidad de propagación.

Existen cinco casos posibles: velocidad del flujo paralelo a la velocidad de propagación, a favor y en contra; velocidad inclinada, a favor y en contra y flujo cruzado.

Se han desarrollado modelos teóricos⁴ de todos los casos de flujo

⁴ Programa teórico de esta investigación, por A. Liñán y colaboradores, expuesto en otra Comunicación.

convectivo opuesto a la propagación y para el flujo cruzado.

La propagación a favor del flujo es un proceso de naturaleza no estacionaria, existiendo solamente modelos teóricos aproximados.

Se han seleccionado cinco velocidades del flujo convectivo: 0 (valor de referencia), 5, 10 y 20 cm/s; lo que implica un total de 20 casos; todos ellos de positivo interés.

También es importante el estudio de la propagación convectiva con composición variables de la mezcla, especialmente en las proximidades del límite de extinción.

Todos estos experimentos se han propuesto para su realización en solamente tres lanzamientos. Esto ha sido posible porque tras diversos análisis se ha decidido realizar los experimentos de propagación utilizando dos varillas simultáneamente.

El material es también PMMA, y las varillas son cilíndricas de 6mm de diámetro. Para el primer vuelo se han seleccionado como experimentos una varilla en situación axial con flujo paralelo y propagación en contra del flujo convectivo, con ignición por un extremo; y una varilla inclinada 45°, con ignición central, con lo que se estudiará en esta última simultáneamente la propagación a favor y en contra del flujo convectivo.

Todo el programa ha sido aprobado por la Comisión Científica de la Agencia Europea del Espacio y el desarrollo del módulo y el primer vuelo han sido ya contratados. El módulo está siendo desarrollado por la empresa SENER con la colaboración de la Escuela, quien tiene a su cargo el experimento y los análisis de resultados.

6. RECONOCIMIENTO

Los autores expresan su reconocimiento a la Agencia Europea del Espacio, quien ha venido subvencionando estos programas mediante cuatro contratos de investigación.

7. REFERENCIAS

1. Connor, C.B. y Pletser, V.: Microgravity Levels Measured During Parabolic Flights. ESTEC, 1987.
2. Sánchez Tarifa, C.; Liñán, A.; Salvá, J.; Corchero, G.; Juste, G.L. y Esteban, F. Heterogenous Combustion Processes under Microgravity Conditions. Combustion Experiments During KC-135 Parabolic Flights, ESA, SP-1113, 1989.
3. Flight Experiment Hardware for Sounding Rocket Investigations. ESA Materials Science and Fluid Science, 1988.

EQUIPO OPTICO

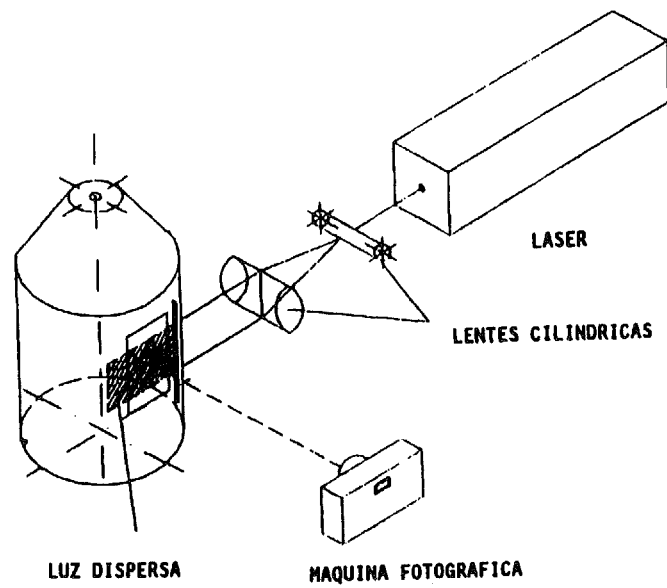


Fig. 13.- Equipo de medición de fluctuaciones.

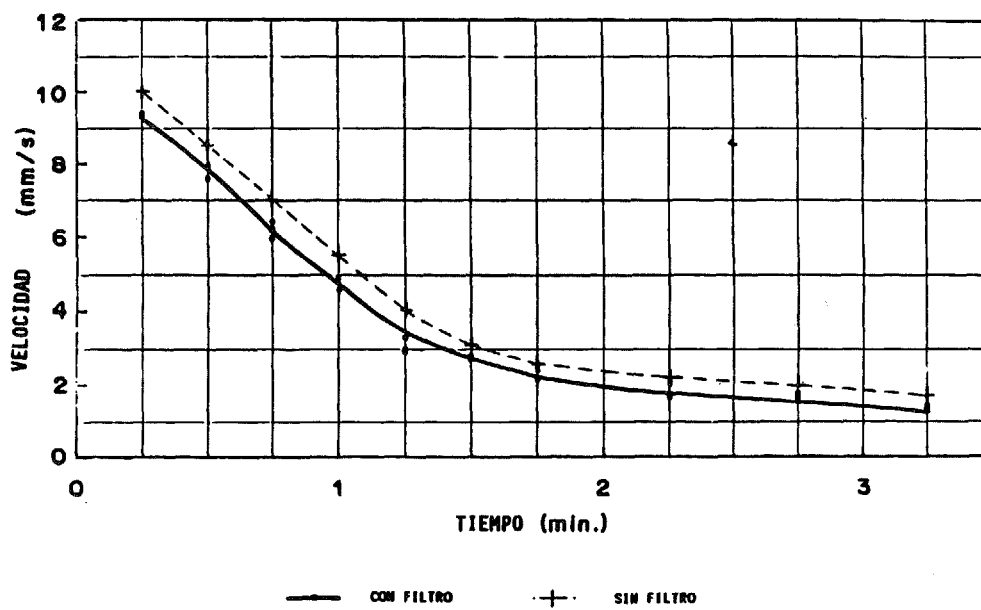


Fig. 14.- Velocidades de fluctuación en función del tiempo.

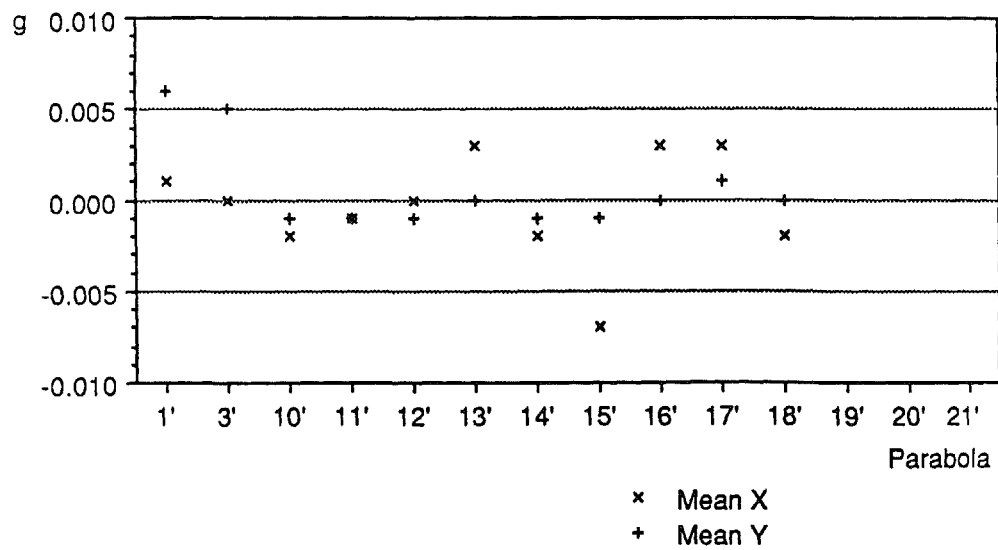
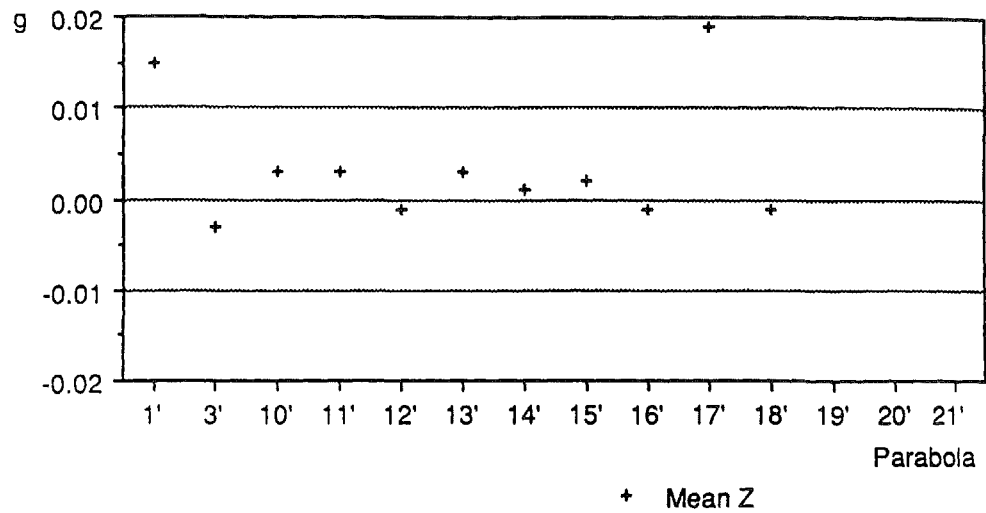


Figura 1: Aceleraciones típicas en un vuelo parabólico.

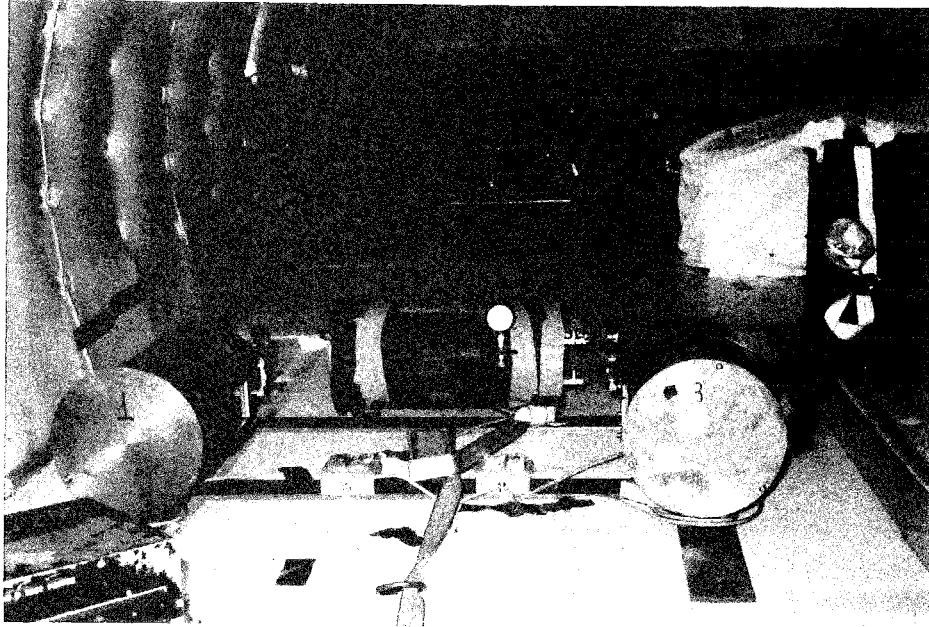


Fig. 2.- Cámaras de combustión en el avión laboratorio NASA KC-135.
Primera Campaña.

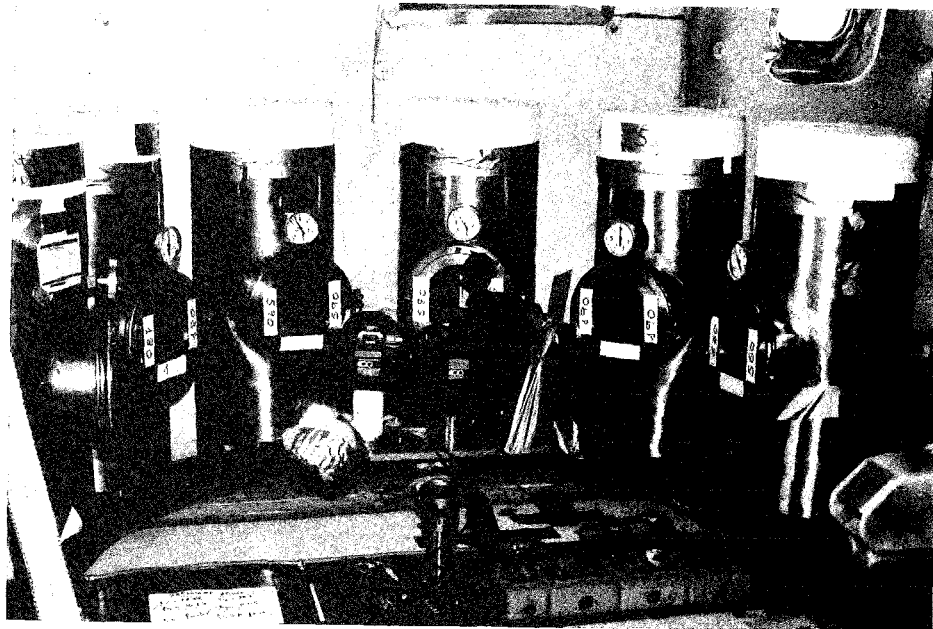


Fig. 3.- Cámaras de combustión en el avión laboratorio NASA KC-135.
Campañas 2ª y 3ª.

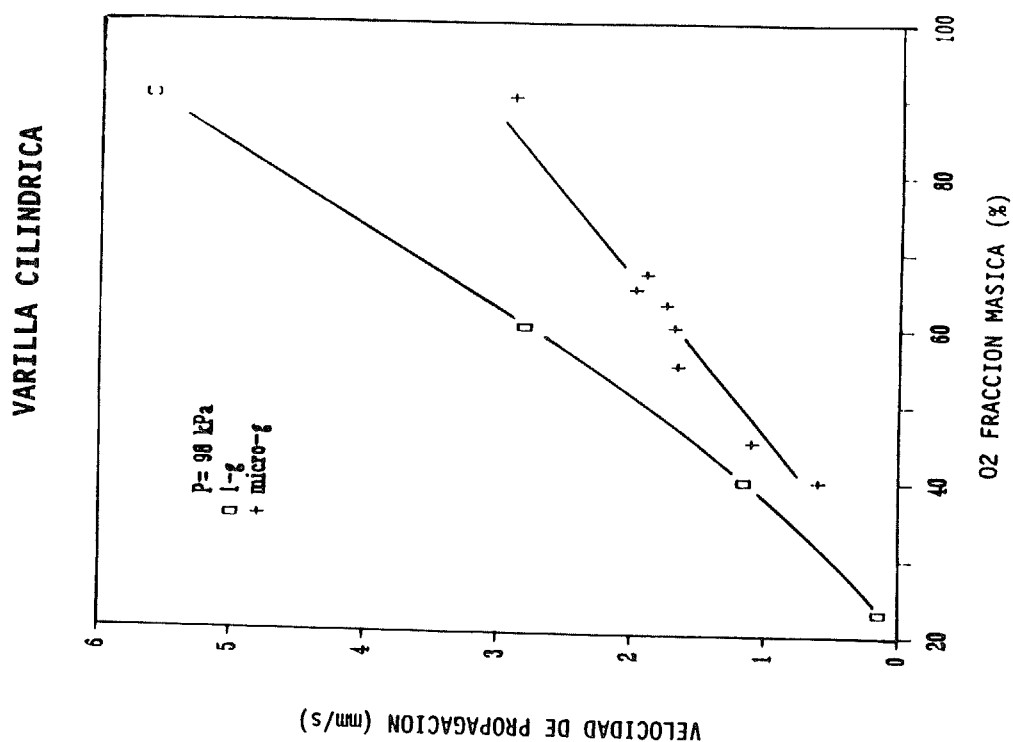


Fig. 4

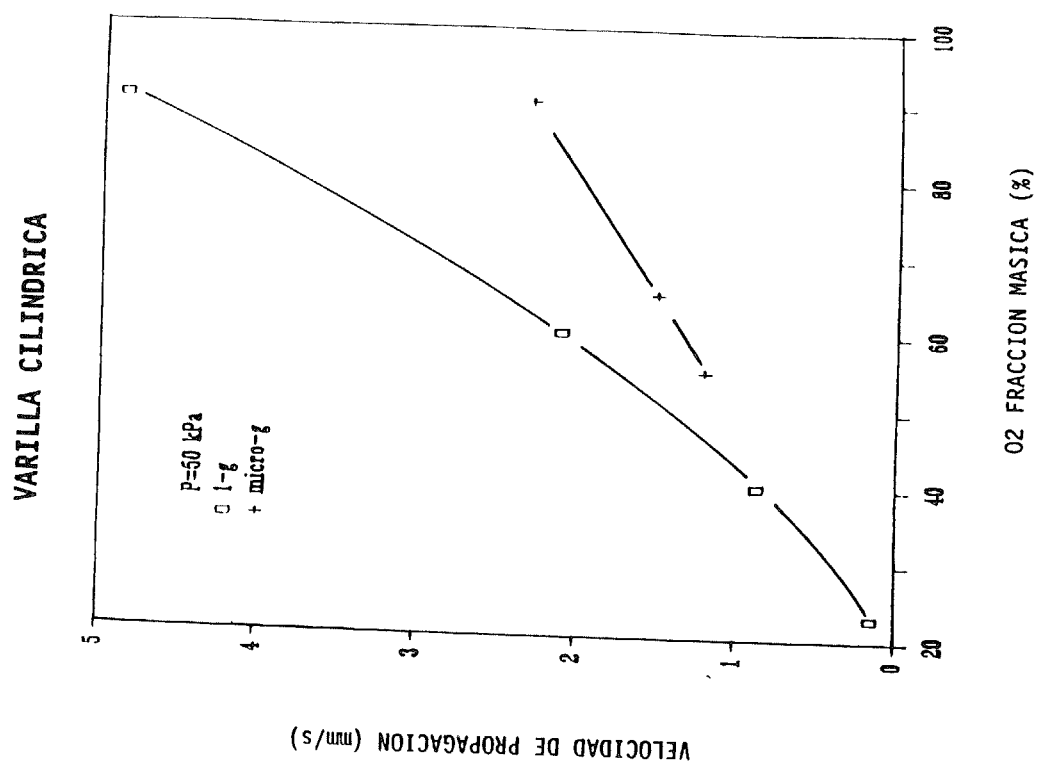


Fig. 5

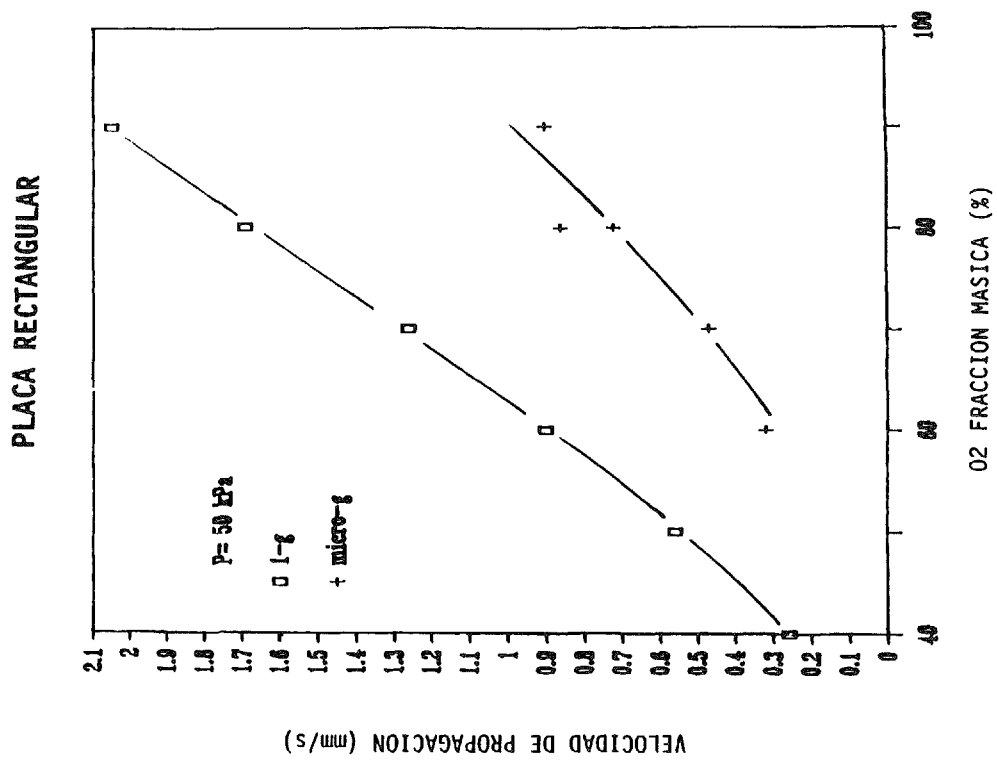


Fig. 7

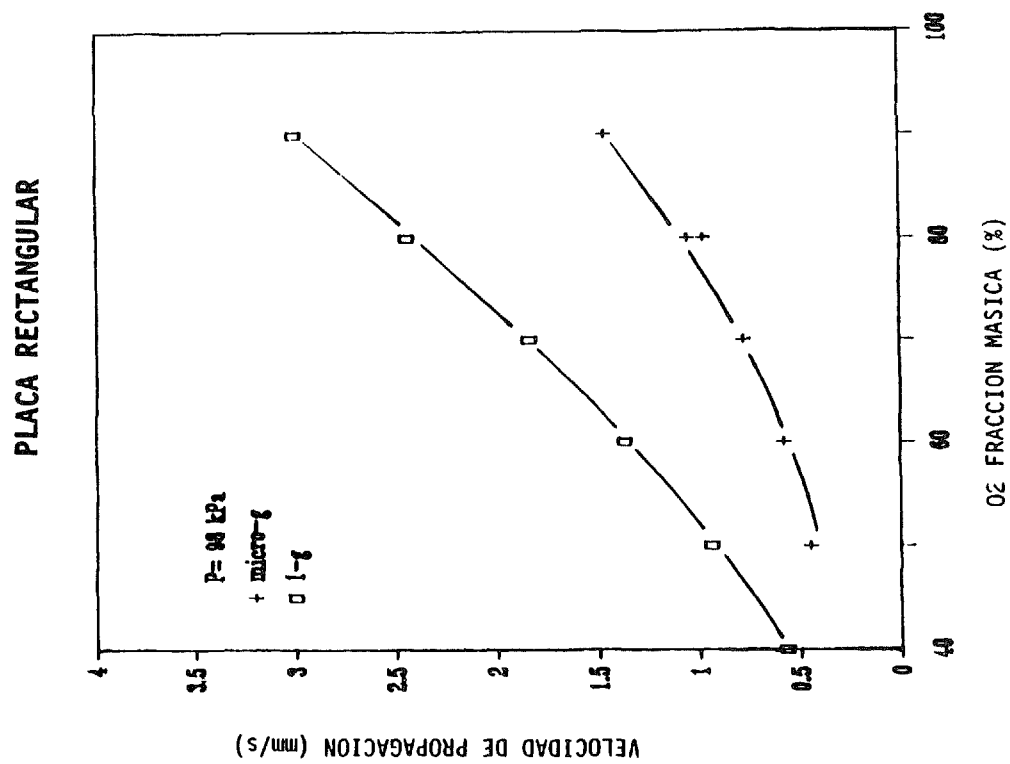
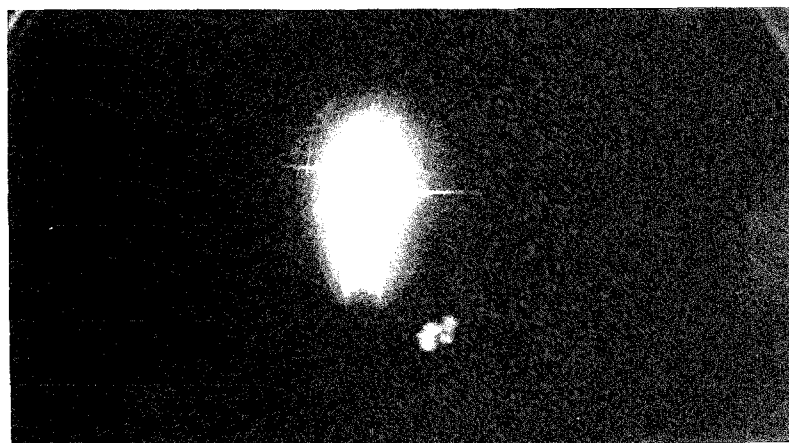
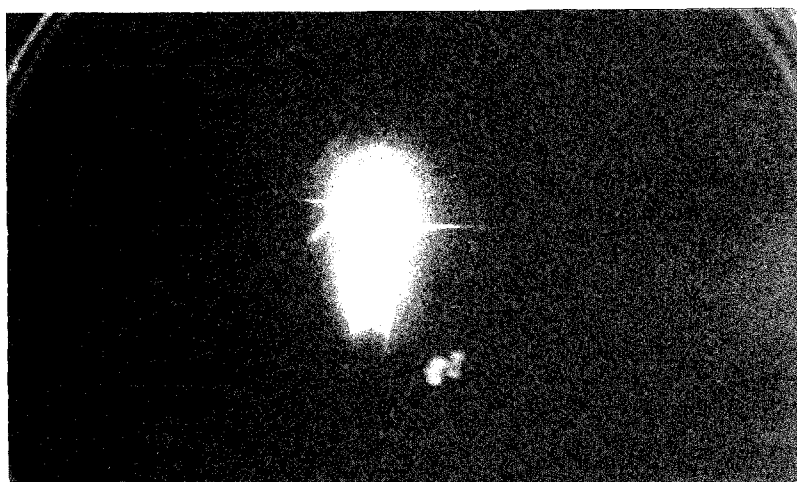


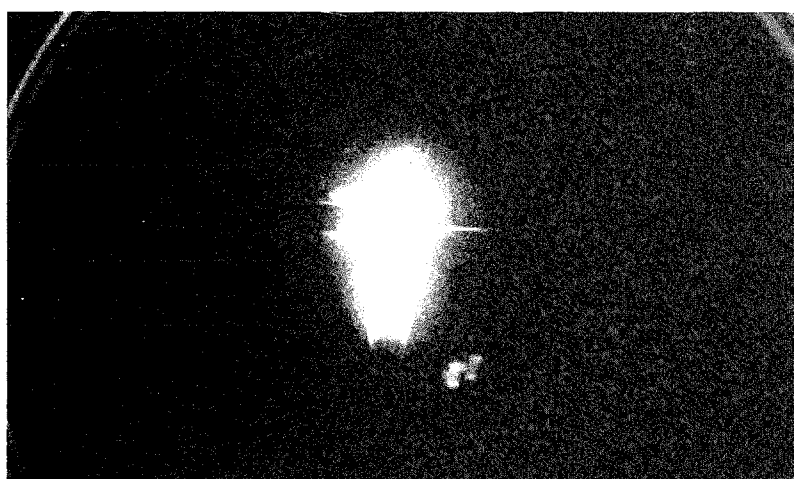
Fig. 6



$t = t_0 \text{ s}$



$t = t_0 + 0.40 \text{ s}$



$t = t_0 + 0.80 \text{ s}$

Fig. 8.- Propagación de una llama sobre una varilla cilíndrica.
Avión NASA KC-135. $Y_{O_2} = 0.90$, $P = 50 \text{ kPa}$.

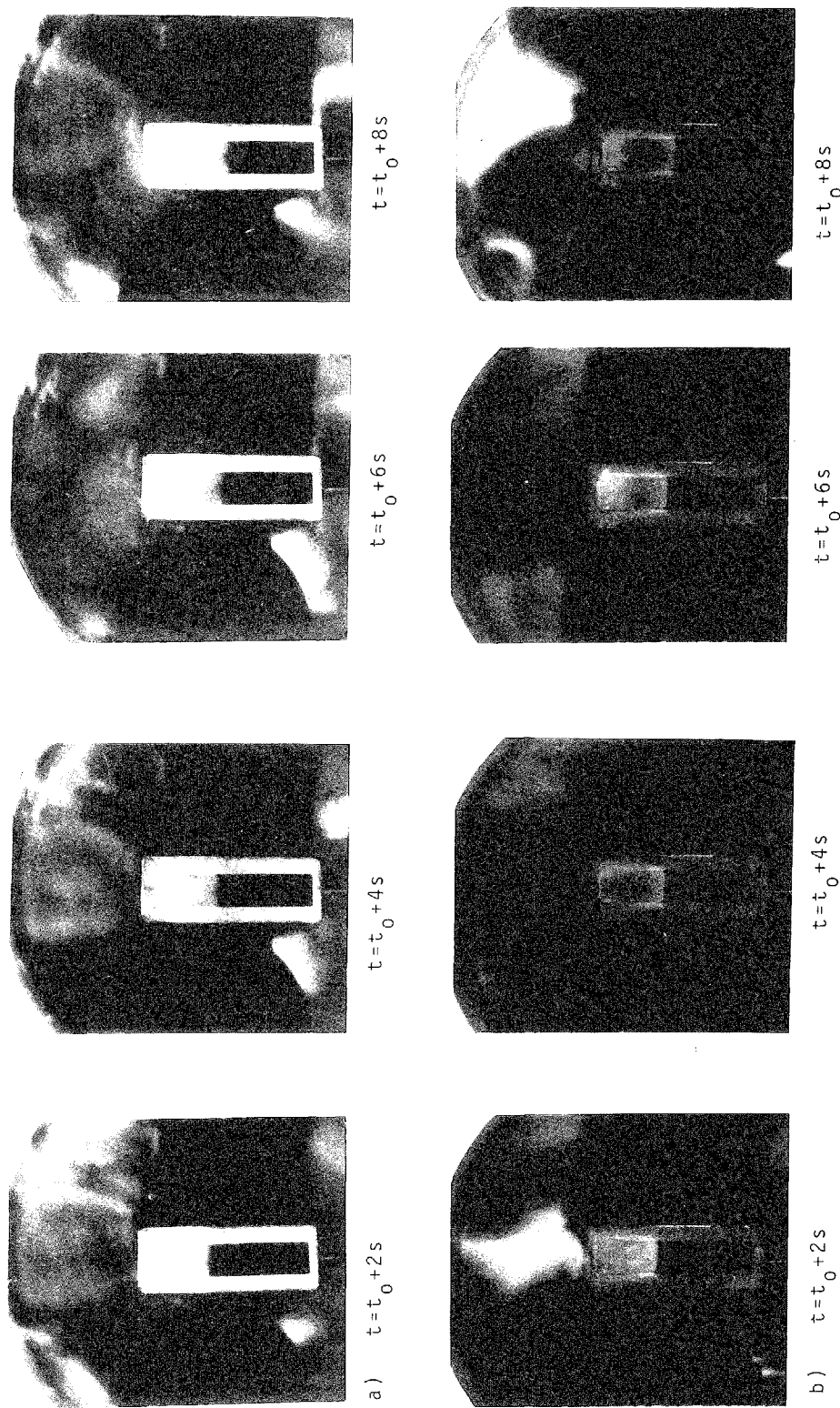


Fig. 9.- Propagación de una llama sobre placa rectangular. Avión NASA KC-135. $\gamma_{O_2} = 0.80$. a) $P = 98$ kPa, b) $P = 50$ kPa

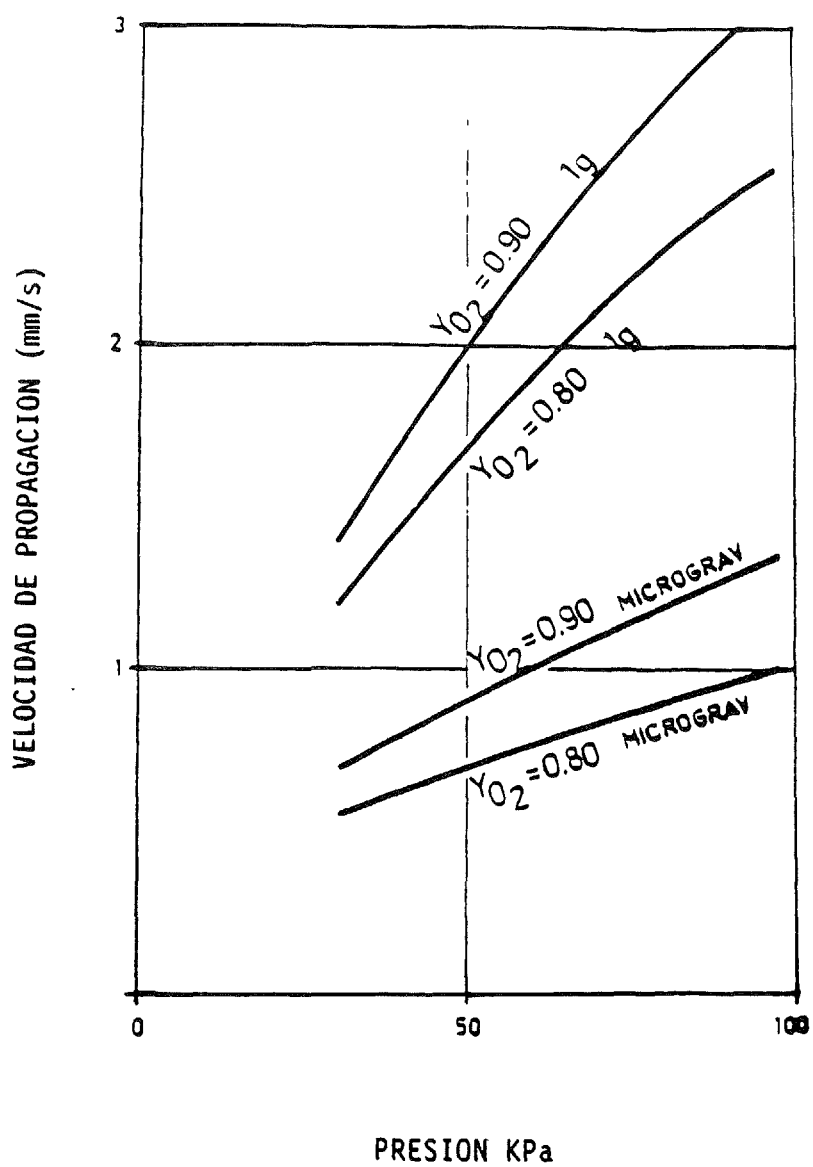


Fig. 10.- Influencia de la presión en la propagación de llamas. Varilla cilíndrica. Avión NASA KC-135.

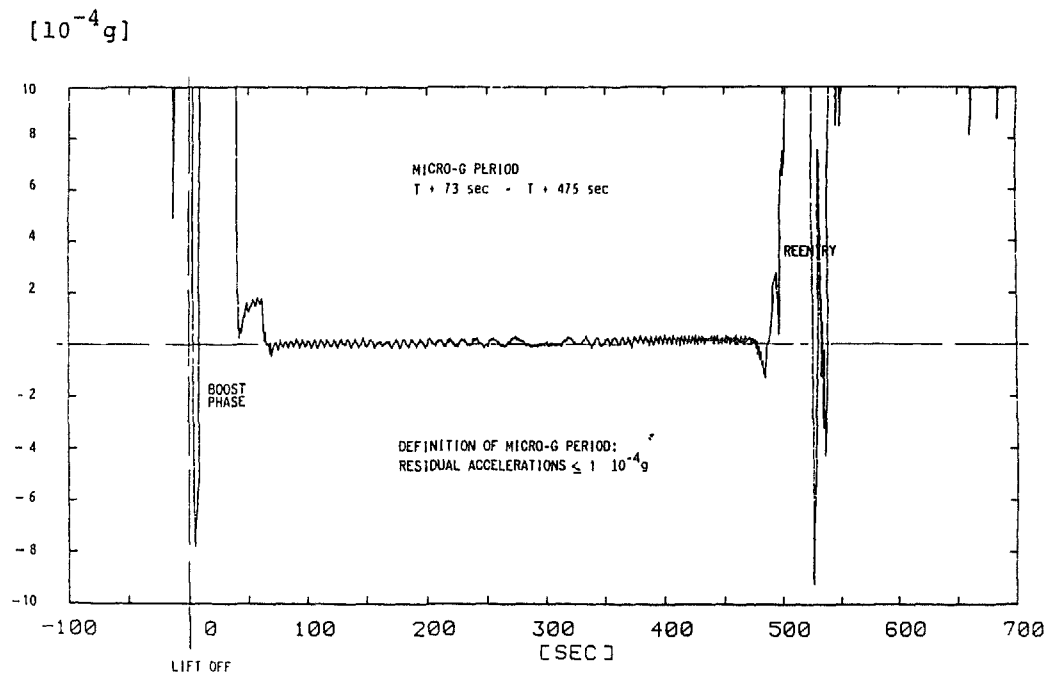
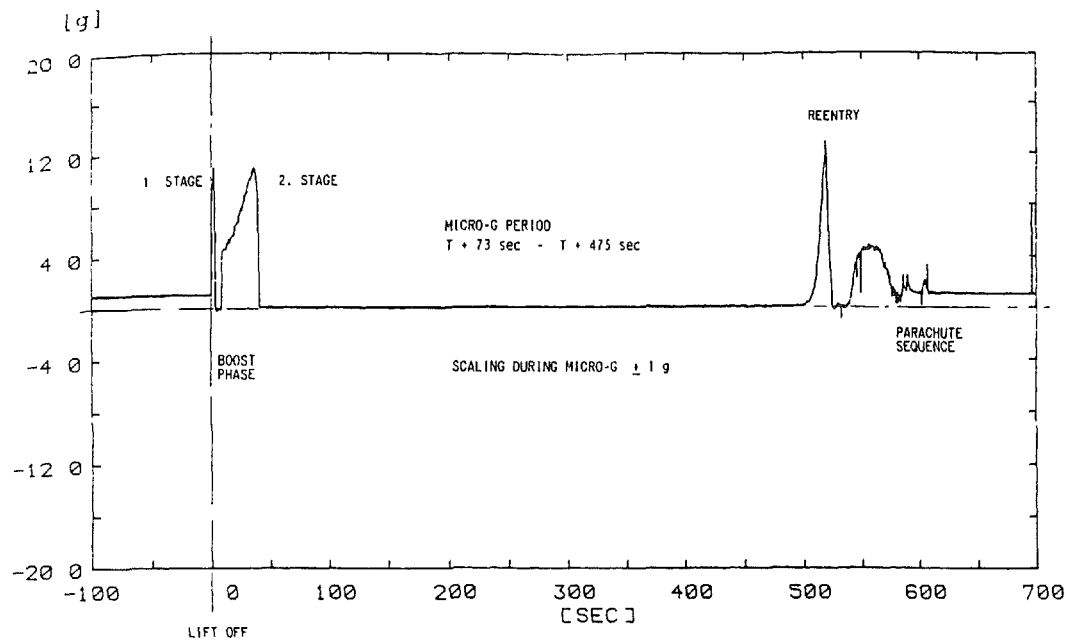
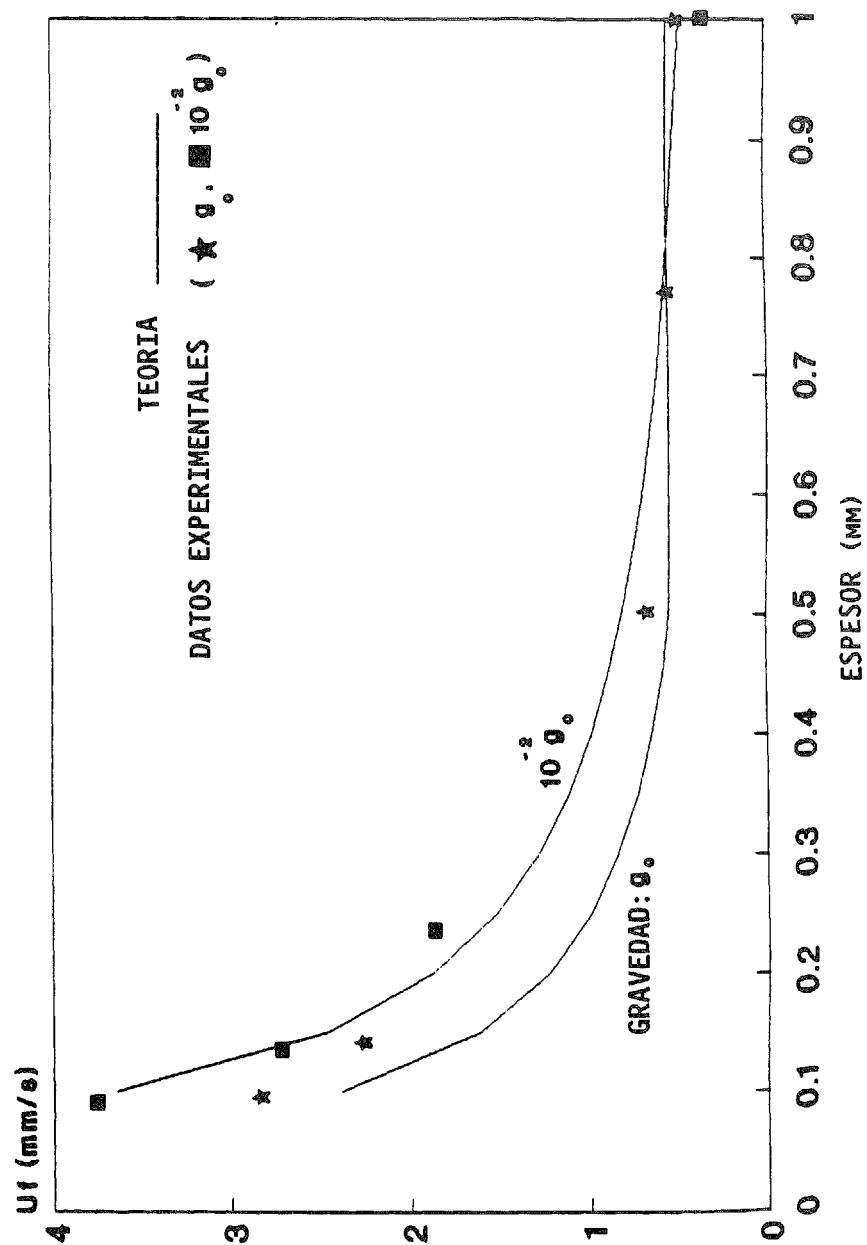


Fig. 12.- Aceleraciones longitudinales típicas en un vuelo del cohete TEXUS.



RADIO: 2 mm. U₀₀: 0. p: 1 atm, Y(O₂): 35%

Fig. 11.- Influencia aproximada del espesor del combustible.
(PMMA, varilla cilíndrica en la velocidad de propagación)